

석탄회 인공경량골재를 사용한 고강도 철근콘크리트 보의 휨거동

Flexural Behavior of Reinforced High-Strength Concrete Beams using Fly Ash Artificial Lightweight Aggregate

진 인 철* 박 완 신** 윤 현 도*** 정 수 영***
Jin, In Cheol Park, Wan Shin Yun, Hyun Do Chung, Soo Young

ABSTRACT

This paper is experimental study on the flexural strength and ductility capacity of reinforced high-strength concrete beams using fly ash artificial lightweight aggregate. Five reinforced high-strength lightweight concrete beams and five reinforced high-strength normal concrete beams with different tensile reinforcement ratio were tested to investigate their behavior.

Test results show that the ratio of flexural strength between experimental results and those by ACI code decrease as the compressive strength of concrete increase. Also, The reinforced concrete beams behave more brittly than those with equal reinforcement ratio(ρ/ρ_b) as the compressive strength of concrete increase.

1. 서론

대도시의 인구 집중화로 인해 건축물이 대형화, 고층화 되어가고 있고 건축물의 구조재료는 고강도화 또는 경량화가 요구되고 있는 실정에서 경량골재를 사용한 구조부재에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다.^{1,2,3,4} 건축구조의 주된 재료로써 가장 일반적으로 사용되는 콘크리트는 다른 재료들에 비해 경제성 및 구조성능에서 우수한 성능을 나타내고 있지만 강도에 비해 비중이 크기 때문에 결국 부재단면이 증가되어 자중의 증가 및 사용면적의 축소라는 기본적인 결점을 동시에 가지고 있다. 이에 반해 경량골재를 사용한 경량콘크리트 부재의 특성은 고정하중의 감소, 부재단면의 축소, 부재내력의 증대, 장스팬구조물의 축조 등에 대한 이점이 있는 반면, 같은 압축강도에서의 보통 콘크리트를 사용한 구조부재에 비해 최대내력이후 강도저하가 현저하고 파괴양상이 취성적이라는 단점이 있다.

따라서 본 연구에서는 석탄회를 사용한 인공경량 골재 콘크리트를 보에 적용하여 휨 거동 양상을 관찰하고 기존규준과의 비교를 통한 성능을 평가하며 인공경량골재를 부재에 사용할 때 안전성에 많은 영향을 미치는 연성에 관한 평가를 함으로써 구조재료로서의 경제성을 파악하는데 그 목적이 있다.

2. 실험

2.1. 실험체 개요

철근콘크리트 부재의 휨연성 거동에 영향을 미치는 요소로는 여러 가지가 있으나 본 연구에서는 인장철근비를 주요 변수로 선정하였고 인장철근은 콘크리트 강도와 철근의 항복강도를 포함한 균형철근비에 대해서 동일한 비율을 갖도록 균형비(ρ/ρ_b)의 개념으로 변수를 선정하였으며 "콘크리트구조설계기준"에서 규정한 최대 인장철근비 이하인 $\rho=0.25\rho_b, 0.4\rho_b, 0.5\rho_b, 0.65\rho_b, 0.75\rho_b$ 로 계획하였다. 동일한 균형비(ρ/ρ_b)에

* 정희원, 충남대 건축공학과 석사과정

** 정희원, 건양대 기계건축토목공학부 조교수, 공학박사

*** 정희원, 충남대 건축공학과 교수, 공학박사

대하여 압축강도를 400kgf/cm²로 하여 경량골재와 천연골재를 사용한 총 10개의 실험체를 제작하였다. 실험체 단면은 폭 18cm, 높이 22cm 이며 길이는 2.79m로 하였다. 실험체는 순수휨응력 구간을 유도하기 위해 2점 가력을 하였고 이 구간에서는 압축철근과 전단보강근을 배근하지 않고 인장철근만을 배근하여 단근보의 형태를 이루었다. 양단부에서 가력점사이의 구간에서는 보의 전단파괴를 방지하기 위해 0.5d 이하 간격으로 전단보강근을 배근하였다. 이상과 같이 계획된 실험체의 특성 및 배근상세는 Table 1과 Fig. 1에 나타내었다.

2.2. 실험체의 재료 및 배합

본 실험에 사용한 시멘트는 KS L에 규정된 국내용 1종 포틀랜드 시멘트를 사용하였고, 조골재는 최대치수 15mm인 일본산 석탄회경량골재(전북익산 송학기업에서 수입)와 최대치수 25mm의 쇄석을 사용하였으며, 세골재는 강모래를 사용하였다. 실험에 사용된 인장철근은 이형철근 SD40을 사용하였고, 전단보강근은 원형철근인 $\phi 6$ 을 사용하였으며 그 결과가 Fig. 2에 나타나 있다.

2.3. 실험장치 및 실험방법

실험은 구조실험용 가력 프레임(Structural Reaction Frame)을 이용하여 실시하였으며 하중가력은 재하보에 연결된 50t량의 오일잭을 이용하여 가력하였다. 가력기에 실험체 설치를 종료한 후 실험체에 예상파괴하중의 1/3까지는 하중을 일정하게 증가시키는 하중조절방식(Load Control)을 사용하고 그 이후부터는 중앙부의 변위를 관찰하면서 변위조절방식(Deflection Control)에 의해 가력하였다.

Table 1 Properties of specimen

시험체명	$f_{ck}(f_{cu})_2$ kgf/cm ²	인장철근	인장철근비 (ρ)	간형철근비 (ρ_b)	ρ/ρ_b
4NB-1	400(314)	2-D13	0.0083	0.025	0.329
4NB-2		3-D13	0.0125	0.025	0.494
4NB-3		4-D13	0.0166	0.025	0.658
4NB-4		5-D13	0.0208	0.025	0.823
4NB-5		6-D13	0.0249	0.025	0.987
4LB-1	400(388)	2-D13	0.0083	0.031	0.266
4LB-2		3-D13	0.0125	0.031	0.400
4LB-3		4-D13	0.0166	0.031	0.533
4LB-4		5-D13	0.0208	0.031	0.666
4LB-5		6-D13	0.0249	0.031	0.799

비 고

4NB-1
4 : 콘크리트 강도(4 : 400kgf/cm²)
N : 보통콘크리트(L : 경량콘크리트), B : Beam
1 : 철근비(1: 0.25 ρ_b , 2: 0.4 ρ_b , 3: 0.5 ρ_b , 4: 0.65 ρ_b , 5: 0.75 ρ_b)

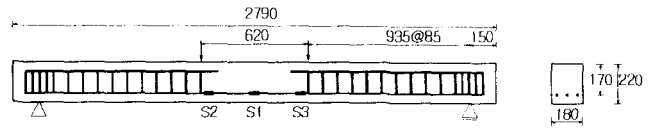


Fig. 1 Details of beam

Table 2 Mix proportion of concrete

	W/C	Repl.SP	Binder Content	Water Content	S/A	Real Volume(l/m ³)				Real Weight(kg/m ³)			
						C	S	G	S+G	C	S	G	S+G
4LB	0.4	0.3	340	136	0.4	107.94	228.83	343.24	572.06	340	606.39	466.80	1073.19
4NB	0.45	0	340	153	0.4	107.94	222.03	333.04	555.06	340	588.37	849.25	1437.61

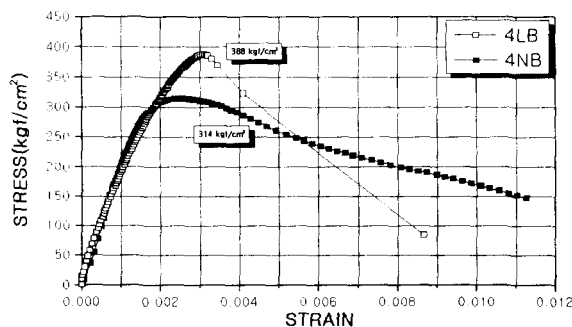


Fig. 2(a) Stress-strain curve of concrete

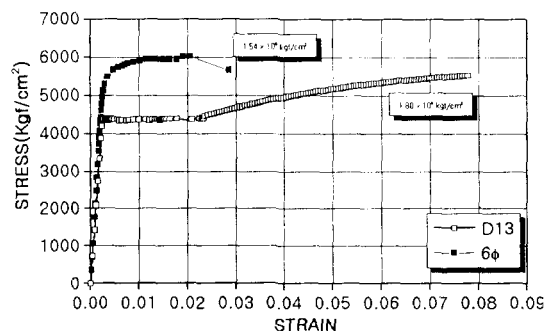


Fig. 2(b) Stress-strain curve of reinforcement

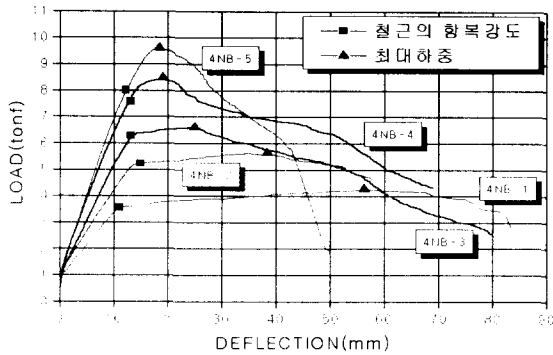


Fig. 3(a) Load-deflection curve of 4NB

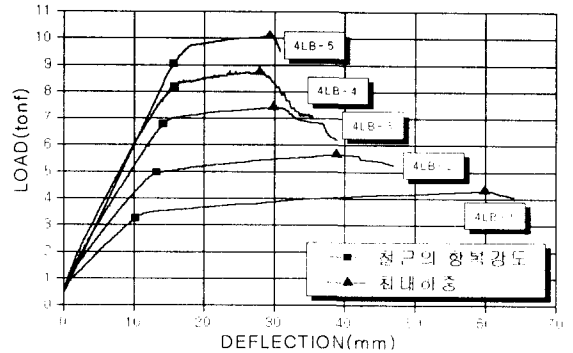


Fig. 3(b) Load-deflection curve of 4LB

3. 실험결과 및 분석

3.1. 파괴양상

초기 균열의 양상을 보면 인장철근비가 증가할수록 초기 균열의 발생하중은 높아졌으며 경량골재에 비해 천연골재가 다소 큰 것으로 나타났다. 또한 균형비가 증가할수록 최대하중 이후의 거동은 천연골재보다 경량골재를 사용하였을 경우 더 큰 취성 파괴를 보였다. 최대하중에 이르면 경량골재를 사용하였을 경우 균형비에 따라 어느 정도의 하중을 유지하다가 휨균열이 더 넓어지면서 압축측 콘크리트가 쪼개져 최종적으로 취성파괴에 이르는 양상을 보였으나 천연골재를 사용하였을 경우에는 균형비가 증가할수록 급속한 하중감소 후 휨균열이 넓어지면서 콘크리트 압축연단의 압축파괴가 발생하였다.

3.2. 하중-처짐곡선

경량골재를 사용한 철근콘크리트 보의 전반적인 하중-처짐 관계는 Fig. 4에서 보는 바와 같이 천연골재를 사용한 콘크리트 실험체의 휨 거동에서 나타나는 하중-처짐 관계 특성과 비슷한 경향을 보였다. 경량골재를 사용한 실험체와 천연골재를 사용한 실험체 모두 인장철근비가 증가할수록 휨 내력은 증가하지만 최대내력 도달 직후 급격한 압축 파괴가 발생하여 처짐은 작게 나타났다. 천연골재를 사용한 경우 인장철근비가 $\rho=0.823\rho_b$, $\rho=0.987\rho_b$ 인 실험체는 대체적으로 최대하중 이후 급격한 하강곡선을 보였으나 경량골재를 사용하였을 경우 $\rho=0.799\rho_b$ 에서도 어느 정도의 연성성을 보여주었다.

3.3. 연성거동

연성이란 부재가 파괴에 이르기 전까지 큰 변형능력을 갖는 성질을 말하며 부재의 연성을 평가하는 데에는 부재의 인장철근 항복시의 처짐을 기준으로 하여 파괴시의 처짐을 고려한 식을 사용하였다.

연성에 관한 결과는 Table 3과 같고 철근콘크리트 보의 연성에 가장 큰 영향을 미치는 균형비와 연성지수의 관계는 Fig. 4에 나타내었다. 실험결과에서 골재의 종류에 상관없이 균형비가 증가할수록 최대하중에서의 연성지수인 μ_u 와 최대하중 이후 80%에서의 연성지수인 μ_i 모두 감소하는 경향을 보여주었다. 또한 천연골재의 경우 $0.65\rho_b$ 이상일 때 연성지수의 변화가 거의 없어 기존의 논문에서 나타

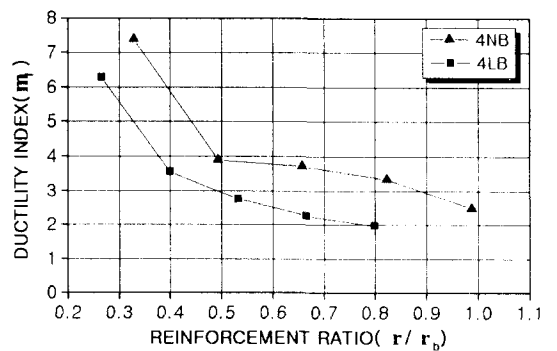
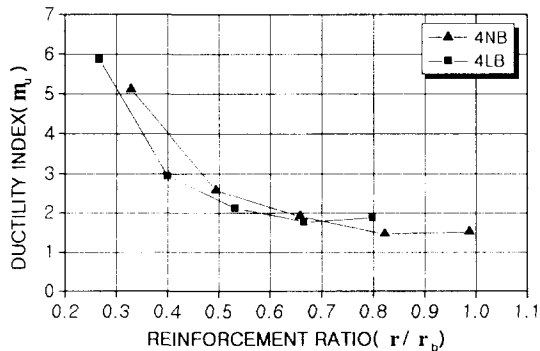


Fig. 4 Ductility index with different reinforcement ratio(ρ/ρ_b)

Table 3 comparison of test results and code equation

실험체명	$f_{ck}(f_{cu})$, kg/cm ²	ρ/ρ_b	Δy	Δu	Δf	μ_u	μ_f	$M_{cr}(tm)$		$M_n(tm)$			P_{cr} (t)	P_{max} (t)	
								Cal.	Exp.	ACI	Exp.	Exp./ACI			
4NB-1	400(314)	0.329	11.00	56.22	81.25	5.11	7.39	0.45	0.45	1.77	2.00	1.13	AVE. 1.02	0.97	4.28
4NB-2	400(314)	0.494	14.87	38.39	57.87	2.58	3.89	0.45	0.78	2.56	2.65	1.04		1.68	5.66
4NB-3	400(314)	0.658	13.07	24.97	48.54	1.91	3.71	0.45	0.88	3.28	3.09	0.94		1.89	6.62
4NB-4	400(314)	0.823	13.13	19.11	43.88	1.46	3.34	0.45	0.78	3.93	3.97	1.01		1.66	8.48
4NB-5	400(314)	0.987	12.24	18.43	30.33	1.51	2.48	0.45	1.06	4.52	4.49	0.99		2.27	9.61
4LB-1	400(388)	0.266	10.20	59.89	64.02	5.87	6.28	0.50	0.37	1.79	2.02	1.13	AVE. 1.03	0.80	4.32
4LB-2	400(388)	0.400	13.22	38.84	46.91	2.94	3.55	0.50	0.48	2.61	2.65	1.01		1.04	5.67
4LB-3	400(388)	0.533	14.14	29.84	38.86	2.11	2.75	0.50	0.65	3.38	3.47	1.03		1.39	7.43
4LB-4	400(388)	0.666	15.77	27.88	35.44	1.77	2.25	0.50	0.63	4.09	4.10	1.00		1.36	8.78
4LB-5	400(388)	0.799	15.64	29.28	30.75	1.87	1.97	0.50	0.76	4.75	4.72	0.99		1.64	10.09

난 일반 고강도 콘크리트의 경향과 일치함을 알 수 있다.¹⁴⁾ 골재의 종류에 따른 각 부재의 연성을 비교하여 보면 최대하중에서의 연성지수인 μ_u 의 경우 대등함을 보였으나 최대하중 이후의 변위를 관찰한 μ_f 의 경우 천연골재에 비해 경량골재가 약 26%의 감소를 보였다. 이는 일반적으로 콘크리트의 강도가 높을수록 동일한 균형비(ρ/ρ_b)일 때 연성은 작아져 고강도 콘크리트 부재의 취성적인 성질을 나타냄을 알 수 있었다.

3.4. 휨강도 및 기존식과의 비교

실험값과 사각형 응력변곡을 사용한 국내 표준식¹⁴⁾과의 비교를 Table 3과 같이 하였다. 본 실험결과 실험체 모두 균형비(ρ/ρ_b)가 증가함에 따라 13~32%의 강도증가를 보였으며 ACI 318-95 규준에 의한 값과 실험값과의 비가 천연골재의 경우 0.94~1.13을, 경량골재의 경우 0.99~1.13을 나타내었다. 실험값과 ACI 318-95 값과의 비에서는 최대값인 1.13을 제외하고 평균값을 구하였을 때 천연골재의 경우 1.00, 경량골재 1.01의 값을 나타내어 표준식(ACI 318-95)과 대등한 값을 보여주었다.

4. 결론

이상과 같이 석탄회 인공경량골재를 사용한 고강도 철근콘크리트 보의 휨거동에 관한 연구를 위해 경량 콘크리트 보 5개와 보통콘크리트 보 5개로 실험한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 초기 균열의 양상을 보면 인장철근비가 증가할수록 초기 균열의 발생하중은 높아졌으며, 경량골재에 비해 천연골재의 초기균열하중이 다소 높은 것으로 나타났다. 또한, 균형비가 증가할수록 최대하중 이후의 거동은 천연골재보다 경량골재를 사용하였을 경우 더 큰 취성 파괴를 보였다.
2. 각 부재의 휨강도에 대한 비교, 분석에서 ACI 318-95 규준에 의한 값과 실험결과에 의한 값의 비가 천연골재의 경우 1.00, 경량골재의 경우 1.01의 값을 나타내고 있는 바, 석탄회 인공경량 골재를 사용한 콘크리트 부재의 설계시 현행 ACI 318-95 표준식을 적용하는 것이 가능하다고 판단된다.
3. 각 부재의 연성지수를 비교하였을 때 최대하중에서의 연성지수인 μ_u 는 대등한 양상을 보였으나, 최대하중 이후의 연성지수인 μ_f 는 천연골재에 비해 경량골재가 전반적으로 약 26%의 감소를 보였다. 이는 콘크리트의 강도가 증가하였기 때문으로 사료되므로 동일한 콘크리트의 강도에서 석탄회 인공경량골재를 사용한 콘크리트의 부재는 천연골재를 사용한 콘크리트 부재의 연성지수와 대등한 양상을 보일 것으로 판단된다.

본 연구는 자원연구소(99 자원기술개발사업)의 연구비 지원으로 수행된 연구결과와 일부임

참고문헌

1. “콘크리트구조설계기준”, 건설교통부제정, 1999
2. 오창륜, 김재식, 박윤근, “전단보강된 고강도경량콘크리트 보의 휨거동에 관한 연구”, 콘크리트 학회 봄 학술발표회 논문집, 1998, pp. 513-518
3. Shuaib H. Ahmad and Roy Barker, “Flexural Behavior of Reinforced High-Strength Lightweight Concrete Beams”, ACI Structural Journal, January-February, 1991, pp. 69-77
4. Shuaib H. Ahmad and Jaime Batts, “Flexural Behavior of Doubly Reinforced High-Strength Lightweight Concrete Beams with Web Reinforcement”, ACI Structural Journal, May-June, 1991, pp. 351-358